DOI: 10.11883/1001-1455(2016)03-0313-06

水陆两栖飞机典型横截面入水撞击实验研究*

王明振[1,2],褚林塘[2,3],吴 彬[1,2],焦 俊[1,2],孙 丰[1,2]

(1. 中国特种飞行器研究所,湖北 荆门 448035;
2. 高速水动力航空科技重点实验室,湖北 荆门 448035;
3. 中航通用飞机有限责任公司,广东 珠海 519000)

摘要: 选取当今世界几种水陆两栖飞机典型横截面为研究对象,通过进行不同投放高度和不同质量的楔形体入水冲击实验,动态测量楔形体入水冲击过程中的压力并记录自由液面变化情况,研究了不同实验件的自由液面变化、冲击压力随时间变化及局部压力分布规律等。通过对比分析,发现带舭弯的弧形横截面型式有利于降低水陆两栖飞机在复杂海况下的着水冲击载荷,可作为水陆两栖飞机设计的参考线型。

关键词: 爆炸力学;入水;冲击;水陆两栖飞机;楔形体

中图分类号: O389;V219 **国标学科代码**: 13035 **文献标志码**: A

对于水陆两栖飞机而言,着水撞击载荷和水面滑行载荷是结构设计的主要载荷工况,现行的确定船体在着水过程中的冲击载荷的计算方法是以 H. Wagner 理论[1]为基础演变的。在某些情况下,船体上某一横截面上的压力分布可以直接用恰当的楔形体上的压力分布来近似。因此,利用楔形体入水撞击实验等效地分析不同横截面型式对着水冲击载荷的影响是一种十分有效的方法。

针对结构物入水冲击问题,已经开展了一系列理论和实验研究工作[2-6]。其中,入水冲击实验主要研究简单 V 型截面的入水冲击特性,例如陈小平等[7]和莫立新等[8]分析了楔形体板架结构刚度对冲击压力和结构响应的影响。L. Xu 等[9]的实验校核了刚性体入水理论。孙辉等[10]进行了二维楔形体入水时的流固耦合响应的实验研究。Y. Ei-Mahdi 等[11]分析了不同斜升角的楔形体入水撞击规律。

水陆两栖飞机在以往设计过程中,为达到提高其快速性、稳定性及耐波性并降低喷溅特性的目的,通常采用带舭弯或变斜升角的截面形式。这种水陆两栖飞机特有的横截面型式在入水撞击压力分布、自由液面变化等方面有其特有的规律,而国内外对水陆两栖飞机船体特有的横截面型式研究较少,未能对水陆两栖飞机着水载荷分析提供足够的数据支持。本文对几种典型水陆两栖飞机船体剖面进行入水实验研究,选型更贴近于实际,可为相似船型的飞机船体外形设计提供相对可靠的参考。

选取当今世界几类具有代表性的水陆两栖飞机典型横截面型式进行入水撞击实验。分析比较不同截面型式入水冲击时的水动力特性,研究舭线浸水深度和船底横向曲率对着水载荷的影响,找出水陆两栖飞机断阶着水工况下最有利的横截面型式。

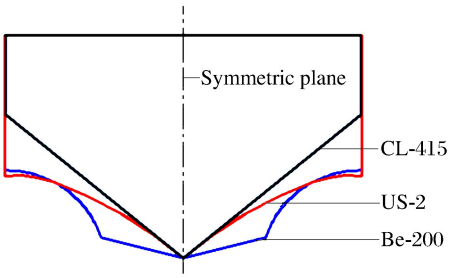

图 1 楔形体横截面对比

Fig. 1 Cross-sectional difference of the three wedges

1 几类水陆两栖飞机横截面型式简介[12]

图 1 为几种船型的对比图。CL-415 飞机在船体的前体与后体横截面上采用无舭弯的 V 型船底,设置有简单直断阶。US-2 飞机在船体截面型式选择上,充分考虑了水面起降的各种性能,其前体采用

* **收稿日期**: 2014-10-21; **修回日期**: 2015-02-16
基金项目: 航空科学基金项目(20120191326091);中航工业科技创新基金项目(2013A60505R)
第一作者: 王明振(1984—),男,硕士,高级工程师,wmznnn1983@126.com。

了带舭弯的截面型式，横截面为弧形。Be-200 是俄罗斯设计的水陆两栖飞机，在船体设计上，采用大长宽比的流线型机身，机身呈圆锥形，前段机身底部呈 W 型，后段为 V 型，采用变化的底部斜升角。

2 实验设计

水陆两栖飞机的着水可能有以下几种情况，断阶、艏部或艉部正常着水，或者艉阶和断阶同时正常着水，现行规范中给定的着水过程存在以下假设：(1)撞击过程无俯仰运动；(2)撞击部位和区段为等截面[13-14]。基于此，利用楔形体入水撞击实验对水陆两栖飞机可能的着水情况进行分析是可行的。

入水撞击实验件安装示意图如图 2 所示。实验件悬挂在电磁钩上之前，先将其在平台上调平。实验采用自由落体的方式实现垂直入水撞击过程，待采集系统装备完毕后，脱开电磁钩，每个实验状态重复 3～5 次。

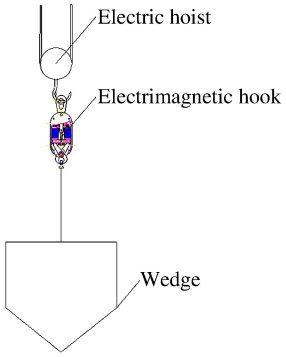

图 2 实验件安装示意图

Fig. 2 Diagram of the experimental set-up

实验件参考 CL-415、US-2、Be-200 等飞机典型横截面进行设计，为等横截面楔形体，加工材料选用红松，楔形体刚度满足实验要求。楔形体大小为 1 m×0.8 m×0.8 m。

本实验主要测试不同质量、高度下楔形体的入水撞击压力大小及分布，记录自由液面变化情况，具体实验参数见表 1，表中 m 为实验件质量，h 为距离水面的高度。

在楔形体底部同一横截面处布置有 7 个压力传感器(型号：BCM520S-3，量程：0～300 kPa，厂家：嘉伟商贸)，如图 3 和表 2 所示，表中 d 为传感器距离楔形体对称面的距离。主要研究压力沿横截面以及水载荷随浸水深度变化规律，分析对比不同横截面的水载荷特性。其中，传感器 4 与传感器 6、传感器 3 与传感器 7 均相对于对称面对称布置，用于判定实验件是否垂直入水。

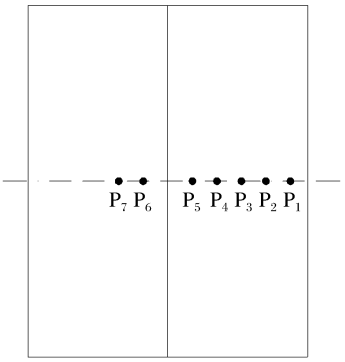

图 3 压力传感器布置图

Fig. 3 Configuration of the pressure transducer

表 1 实验参数

Table 1 Test parameters

工况	m/kg	h/mm
1	50	450
2	50	800
3	70	450
4	70	800

表 2 压力传感器布置位置

Table 2 Configuration of the pressure transducer

传感器	d/mm		
	楔形体 1	楔形体 2	楔形体 3
1	280	370	280
2	250	280	250
3	150	180	150
4	75	100	75
5	30	30	30
6	75	100	75
7	150	180	150

3 实验结果分析

3.1 自由液面的变化

楔形体入水时撞击过程很短暂，仅仅持续几十毫秒。楔形体与水面发生冲击作用时，会引起水的反向运动，在楔形体表面形成排挤波，从而使得湿表面有所增加并影响流体与结构之间的速度[15]。

楔形体入水过程中，液体表面受到物面的挤压、表面张力、大气压力和重力等因素共同作用，会沿着

楔形面抬升而形成喷射区域，喷射区对于确定流场的动边界和楔形体湿表面的长度起着重要作用[16]。

对于水陆两栖飞机而言，舭线浸水深度是影响水载荷系数的主要因素之一。其他参数相同的前提下，舭线浸水与不浸水的撞击载荷的比值，一般小于 1，即舭线浸水总是趋于减少最大加速度[14]。水陆两栖飞机着水撞击载荷系数 n_w 可表示为[14]：

$$n_w=\frac{2vhv_0^2}{g(1+vh^2)^3},\qquad v=\frac{\rho k(\beta)}{2M},\qquad k(\beta)=\pi\left(\frac{\pi}{2\beta}-1\right)^2$$

式中：h 为浸水深度，β 为底部斜升角，v_0 为入水时的着水速度，ρ 为海水密度，M 为线质量 。

本实验通过摄像机及照相机得到了不同横截面入水过程中某个时刻的水面形状，开始水面只是贴近底板面处有变形，随后，出现射流，即喷溅。底板附近水面向下凹，随着凹下水面的升高，射流从底板边缘射出。但由于横截面形式的不同，射流出现的时间、形状及强度不尽相同。

从图 4 可以看出，楔形体 1 舭线浸水深度最大，楔形体 2 次之，楔形体 3 最小，根据上述理论分析可知，在其他参数不变的情况下，楔形体 1 舭线浸水深度最大，所承受的着水撞击载荷系数最小，楔形体 3 体舭线浸水深度最小，着水载荷系数最大。

从图 5～6 可以看出，楔形体 1 水面形状变化最剧烈，从喷溅性能方面看，其喷溅高度为2 741.2 mm、宽度为 2 539.0 mm，喷溅性能最差，楔形体 2 喷溅高度为1 833.8 mm、宽度为2 261.4 mm，喷溅性能明显改善，楔形体 3 喷溅高度为 962.3 mm、宽度为 1 858.5 mm，喷溅性能最好。

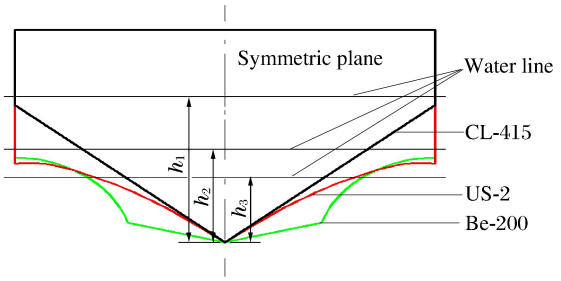

图 4 楔形体浸水深度对比

Fig. 4 Difference in immerged depths

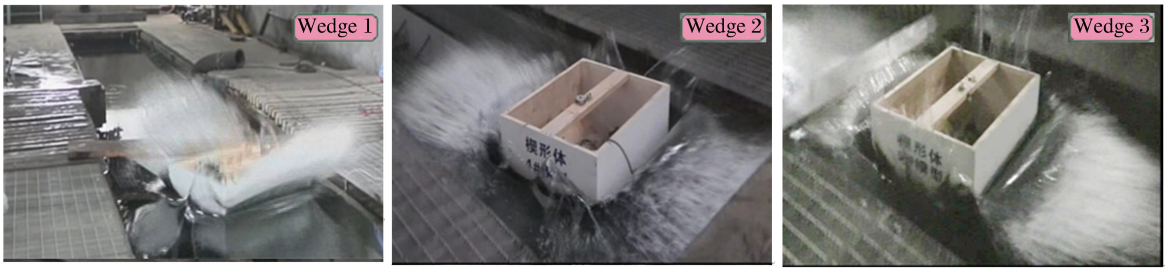

图 5 工况 2 下锲形体投放 0.3 s 后自由液面变化

Fig. 5 The free surface variety for case 2 at 0.3 s

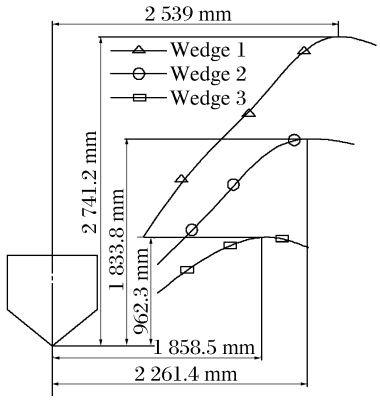

图 6 喷溅高度和宽度对比

Fig. 6 Spray height and width

3.2 压力分布对比分析

对于水陆两栖飞机而言，若飞机对称着水，针对无舭弯的船底，由于触水速度和浸水深度的影响，舭处的压力为龙骨处压力的 75%，龙骨与舭处的压力成线性分布[13]；对于带舭弯的船底，由于舭处压力要比无舭弯的船底压力要略大，舭弯起点处的压力与无舭弯船底的压力相同，舭和舭弯起点之间的压力成分段线性分布。即，针对无舭弯的横截面，局部压力沿横向从大到小线性分布；有舭弯的船底，局部压力沿横向大-小-大分布[13]。

从图 7 可以看出，在 0.02 s 的时间内，测压点处水动力完成能量的积聚与释放，形成冲击压力峰值。从图 8 可以看出，不同测压点的压力峰值出现时间不同，随着实验件浸水深度的增加，从测压点 5 到测压点 1 依次与水面遭遇，测压点 5 峰值最大出现在6.004 s，测压点 1 峰值最小出现在 6.068 s。

从图 9～10 可以看出，楔形体质量及入水速度越大，着水冲击载荷越大，同一入水速度不同质量下底部压力沿横截面方向分布趋势相同，且随质量的增加而增大，同一质量不同入水速度下，距离对称面越远，入水速度不同引起的压力变化越小。从局部压力沿横向分布规律来看，楔形体 1～3 局部压力沿横向从大到小非线性分布；楔形体 2 局部压力沿横向大-小-大的非线性分布。综合看来 3 种模型在不同质量和不同速度下的压力峰值变化依模型编号次序增大。

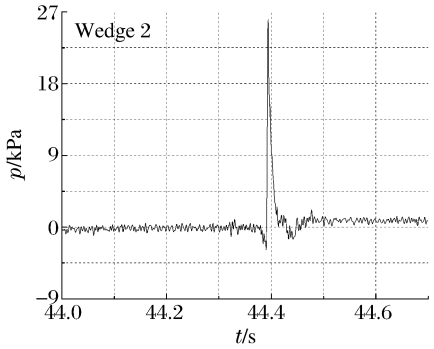

图 7 测压点 2 处的压力曲线

Fig. 7 Pressure curve measured by the pressure transducer 2

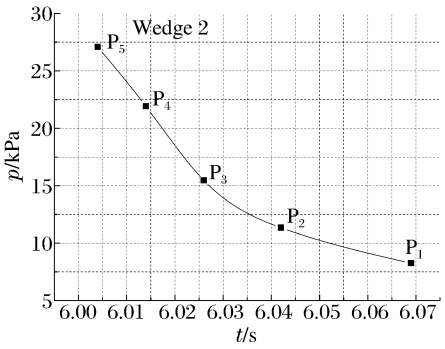

图 8 不同测压点压力峰值到达时间对比

Fig. 8 Peak pressure time of all transducers

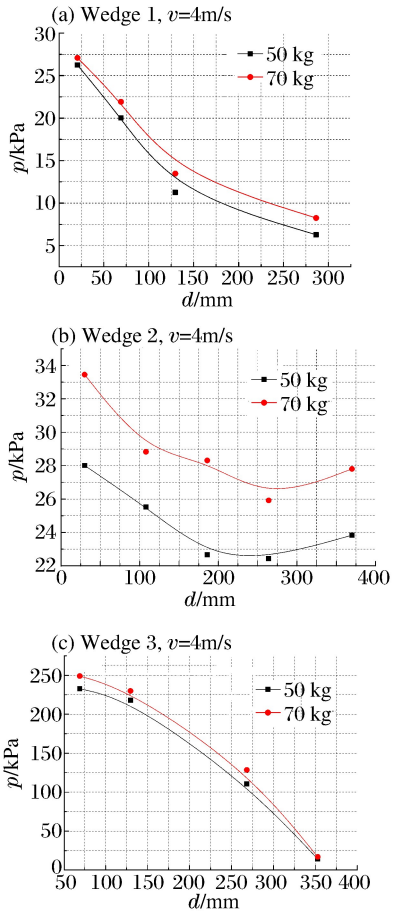

图 9 楔形体质量不同时压力沿横向分布情况

Fig. 9 Pressures for different wedge masses

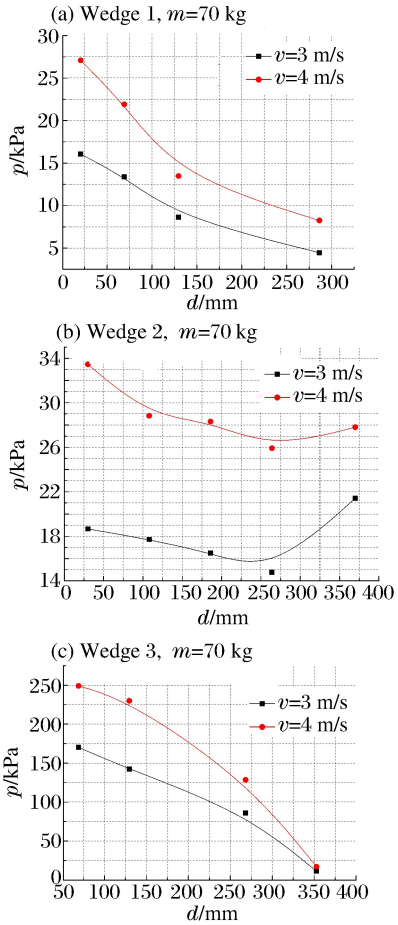

图 10 楔形体速度不同时压力沿横向分布情况

Fig. 10 Pressure curves of wedges with different velocities

楔形体入水撞击压力值的大小与实验件的质量、入水速度、底部构型有关，质量和入水速度相同的情况下，楔形体受到的冲击压力与构型有关，图 11 和表 3 给出了 3 个模型在质量 70 kg、入水速度为

4 m/s工况下的压力峰值，易知在楔形体 1 横截面形式为简单 V 型截面且斜升角较大，受到的冲击压力值最小；楔形体 2 横截面形式为弧形，受到的冲击压力值比楔形体 1 略大；楔形体 3 横截面采用分段的形式，第 1 段底部斜升角较小、第 2 段舭弯较大，受到的冲击压力值最大，从而验证了 3.1 节中的结论。

表 3 3 个楔形体峰值压力对比

Table 3 Peak pressures of the three wedges

传感器	p/kPa		
	楔形体 1	楔形体 2	楔形体 3
1	28.06	30.81	247.36
2	22.60	29.02	210.79
3	21.34	27.74	176.58
4	20.67	26.80	135.11
5	20.18	26.70	82.11

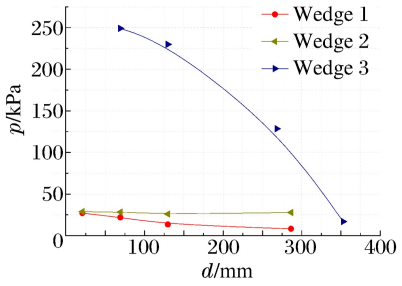

图 11 压力沿横向分布对比

Fig. 11 Pressure distribution of the three wedges

4 结　论

通过实验研究，针对不同横截面的楔形体垂直入水，可以得到以下结论：

(1)通过摄像记录了垂直入水冲击产生的射流运动(喷溅)。楔形体 1 水面形状变化最剧烈，喷溅性能最差，喷溅高度是楔形体 3 的 2.85 倍左右；楔形体 2 喷溅性能明显改善，喷溅高度是楔形体 3 的 1.91 倍左右；楔形体 3 喷溅性能最好，但舭线浸水深度最小，着水冲击载荷最大。

(2)楔形体质量及入水速度越大，着水冲击载荷越大，但底部压力沿横截面方向分布趋势相同；同一质量不同入水速度下，距离对称面越远，入水速度不同引起的压力变化越小。

(3)3 种模型在不同质量和不同速度下的压力峰值变化依模型编号次序增大。对于质量 70 kg、入水速度为 4 m/s 工况，楔形体 2 最大与最小压力之比最小，为 115%左右；楔形体 1 次之，为 139%左右；楔形体 3 最大，为 301%左右。从结构设计方面考虑楔形体 2 线型最有利于控制结构质量。

(4)实验验证了局部压力沿横向分布规律，即无舭弯的横截面，局部压力沿横向从大到小非线性分布；有舭弯的船底，局部压力沿横向大-小-大非线性分布。

综合上述结论可知，楔形体 2 着水载荷比楔形体 1 略大，喷溅性能介于楔形体 1 和 3 之间。且从结构设计考虑，采用楔形体 2 的横截面型式进行船体设计的飞机，着水载荷沿横向分布更合理。在进行水陆两栖飞机船体设计时，在对其他水动性能影响不大的前提下，建议采用该横截面型式进行船体设计。

参考文献：

[1] Wagner H. Landing of sea plane[R]. NACA Tech Memo 622, SITDL TR 2101, 1931.

[2] 王永虎，石秀华. 入水冲击问题研究的现状与进展[J]. 爆炸与冲击，2008，28(3)：276-282.
Wang Yonghu, Shi Xiuhua. Review on research and development of water-entry impact problem[J]. Explosion and Shock Waves, 2008, 28(3): 276-282.

[3] Fairlie-Clarke A C, Tveitnes T. Momentum and gravity effects during the constant velocity water entry of wedge-shaped sections[J]. Ocean Engineering, 2008, 35(7): 706-716.

[4] Xu G D, Duan W Y, Wu G X. Numerical simulation of oblique water entry of an asymmetrical wedge[J]. Ocean Engineering, 2008, 35(16): 1597-1603.

[5] Mei Xiaoming, Liu Yuming, Dick K P. On the water impact of general two-dimensional sections[J]. Applied Ocean Research, 1999, 21(1): 1-15.

[6] Sun Hui, Odd M F. Water impact of horizontal circular cylinders and cylindrical shell[J]. Applied Ocean Research, 2006, 28(5): 299-311.

[7] 陈小平，李军伟，王辉，等. 大尺度楔形体板架钢模落体试验和仿真研究[J]. 船舶力学，2012，16(10)：1152-1163.
Chen Xiaoping, Li Junwei, Wang Hui, et al. Experiments and numerical investigation of water entry of large-scale

steel wedge models[J]. Journal of Ship Mechanics, 2012,16(10):1152-1163.

[8] 莫立新,王辉,蒋彩霞,等.变刚度楔形体板架落体砰击试验研究[J].船舶力学,2011,15(4):394-401.
Mo Lixin, Wang Hui, Jiang Caixia, et al. Study on dropping test of wedge grillages with various types of stiffeness [J]. Journal of Ship Mechanics, 2011,15(4):394-401.

[9] Xu L, Troesch A W, Peterson R. Asymmetric hydro-dynamic impact and dynamic response of vessels[J]. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 1999,121(2):83-89.

[10] 孙辉,卢炽华,何友生.二维楔形体冲击入水时的流固耦合响应的试验研究[J].水动力学研究与进展,2003,18(1):104-109.
Sun Hui, Lu Zhihua, He Yousheng. Experimental research on the fluid-structure interaction in water entry of 2D elastic wedge[J]. Journal of Hydrodynamics, 2003,18(1):104-109.

[11] Ei-Mahdi Y, Alain D, Yvan C. Experimental study on the water impact of a symmetrical wedge[J]. Fluid Dynamic Research, 2006,38:47-66.

[12] 胡问鸣.通用飞机[M].北京:航空工业出版社,2008:216-240.

[13] 中国民用航空局.中国民用航空规章,第 25 部:运输类飞机适航标准(CCAR-25R4)[S]. 2009.

[14] 孙侠生.民用飞机结构强度刚度设计与验证指南[M].北京:航空工业出版社,2012:282-284.

[15] 闫发锁,董丽娜,顾学康,等.计及流固耦合时楔形结构的冲击压力计算[J].哈尔滨工程大学学报,2007,28(11):1202-1205.
Yan Fasuo, Dong Li'na, Gu Xuekang, et al. Effects of fluid-solid interaction on calculations of slamming pressure for wedged structures[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2007,28(11):1202-1205.

[16] 张于维,王志东,晋文菊,等.二维楔形体砰击载荷研究[J].中国舰船研究,2010,5(3):34-37.
Zhang Yuwei, Wang Zhidong, Jin Wenju, et al. Numerical simulationon slamming load of two dimensional wedge-shaped section[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2010,5(3):34-37.

Experimental study on the water impact of a typical cross section for amphibious seaplane

Wang Mingzhen[1,2], Chu Lintang[2,3], Wu Bin[1,2], Jiao Jun[1,2], Sun Feng[1,2]

(1. *China Special Vehicle Research Institute*, *Jingmen* 448035, *Hubei*, *China*;
2. *Key Aviation Scientific and Technological Laboratory of High-Speed Hydrodynamic*, *Jingmen* 448035, *Hubei*, *China*;
3. *China Aviation Industry General Aircraft Co*, *Ltd*, *Zhuhai* 519000, *Guangdong*, *China*)

Abstract: The effect of hydrodynamic impact on the amphibious seaplane is an important consideration in its structural designing and intensity checking. In addition, such impact is a major factor affecting its structural weight. By varying two parameters: drop height and drop weight in the experiment, the pressure and the change of the free surface of liquid for three different wedges are dynamically measured. In the present work, the local pressure distribution, the impact pressure changing with time and the variety of the free surface on several free-falling wedges have been investigated. These wedges have been chosen from the representative cross section of amphibious seaplanes commonly used worldwide. By comparing the experimental results, the conclusion is reached that the wedge with a flared cross section reduces the impact pressure effectively when the amphibious seaplanes land on intricate waves. This study is expected to offer valuable reference for the hull designing of the amphibious seaplane.

Key words: mechanics of explosion; water-entry; impact; amphibious seaplane; wedge

(责任编辑 曾月蓉)